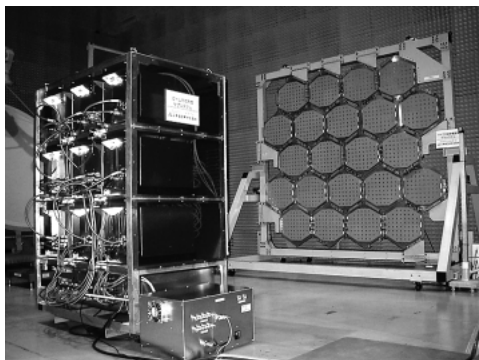


マイクロ波送電技術の開発

Technology and Applications of Microwave Energy Transmission



飯塚 健二	長谷川 修	森下 慶一
木村 友久	牧村 裕樹	松本 紘
橋本 弘藏	篠原 真毅	

エネルギー問題、地球環境問題を解決し得る技術として脚光を浴びている宇宙太陽発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の基幹技術であるマイクロ波送電技術は、地上での応用（離島、遠隔地への電力伝送等）も見込まれ、注目を集めている技術である。これに対し当社では、マイクロ波送電技術において世界的に先行する京都大学・宇宙電波科学研究センターと共同で、宇宙太陽発電衛星、及び地上受電設備への適用をねらったマイクロ波送電試験装置を開発した。本稿では、この技術の特徴と今後の展開について紹介する。

1. はじめに

21世紀に入り、宇宙空間で大規模な太陽光発電を行い、得られた電力を地上に無線伝送して利用する宇宙太陽発電システムの計画が本格化しつつある。これは、上空36 000 kmの静止衛星軌道上で発電した1～10 GWの電力を2.45 GHzもしくは5.8GHzの電波（マイクロ波）を用いて地上へ無線伝送し、地上でこれを再び電力エネルギーに変換して利用しようというものであり、発電時に化石燃料を消費しないために、エネルギー問題、地球温暖化問題を解決する技術として期待されている。さらに、このための基幹技術であるマイクロ波による無線電力伝送技術は、宇宙太陽発電システムへの応用を始め、地上での応用（離島、遠隔地への電力伝送等）も見込まれており注目を集めている。

2. システム概要

本システムは次の3つのサブシステムから構成される（図1）。

マイクロ波送電サブシステム

ビーム形成制御サブシステム

マイクロ波受電整流サブシステム

マイクロ波送電サブシステムは発振器としてマグネトロンを用いて高効率・高出力を目的とした送電装置である。このサブシステムは9台のマグネトロンを協調動作させ、1.26 kW以上の高出力を実現した。

ビーム形成制御サブシステムは発振器として半導体発振器及び増幅器を用いて高精度のビーム制御を目的とした送電装置である。このサブシステムは144個のアンテナすべての位相を制御することで高精度のビーム制御を実現した。

マイクロ波受電整流サブシステムは、上記2つの送電装置からの送電マイクロ波を受電／整流し、LEDを点灯することで受電部分を視覚的に確認することができる装置である。

モニタ切替えスイッチの設定を切り替えることで制御コンピュータにより受電電圧をモニタできる機能も有している。また、複数のパネルを積み重ねた収納状態から平面型に展開可能な構造となっている。

3. 技術の特徴

3.1 マイクロ波送電サブシステム

マイクロ波送電装置では、全体の効率が重要である。すなわち宇宙太陽発電システムであれば衛星に搭載した太陽電池で発電された電力に対して、地上でいかに多くの電力が取り出せるかが問題となる。製作したマイクロ波送電サブシステムには、直流電力をマイクロ波に変換する部分として、半導体より高効率・大出力のマグネトロンを採用した。

今回の装置は複数のマグネトロンを協調動作させ、発信位相を制御することで、特定方向に送電ビームを向けることができる。一般にマグネトロンは電子レンジ等の加熱用途に使用され、低価格であるものの、通常はその出力にノイズが多いため、複数協調動作には工夫が必要である。そこでマグネトロンの次の特性を用いて出力ノイズを低減し、協調動作可能なシステムとした。 流れる電流（陽極電流）の大きさによって出力周波数が変化する、 外部からある周波数の電力（注入信号）を注入すると、出力は注入信号の周波数に同期する、 同期した出力の位相は、注入なしの場合の出力周波数と注入信号の周波数の差で決定される。

この特性を用い、一つの基準発振器の出力を分岐し、すべてのマグネトロンに注入し、各マグネトロンの電流をコントロールすることで複数マグネトロンの出力周波数・位相を統一するシステムとした。

製作したマイクロ波送電サブシステムは、9台のマグネトロンを協調動作させ288個のアンテナ素子から合計1.26 kW以上の出力が得られる。図2にマイクロ波送電サブシステムを示す。

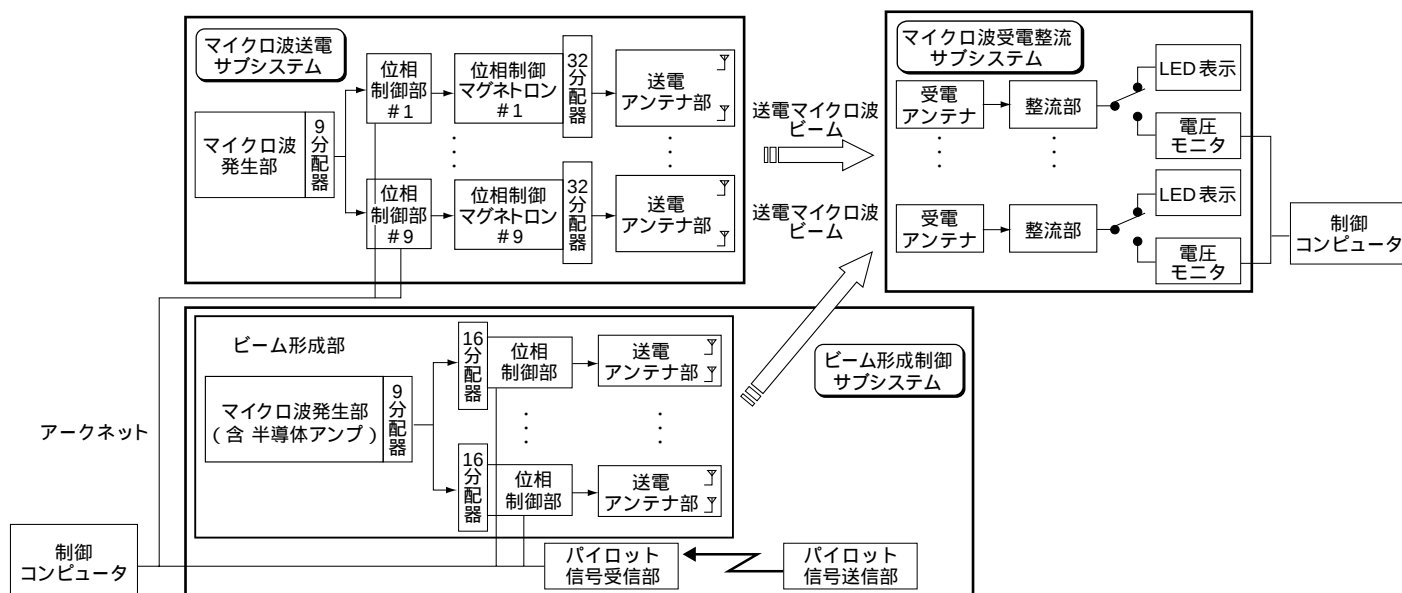


図1 機能ブロック図 マイクロ波送電サブシステム、ビーム形成制御サブシステム、マイクロ波受電整流サブシステムの3つから構成される。

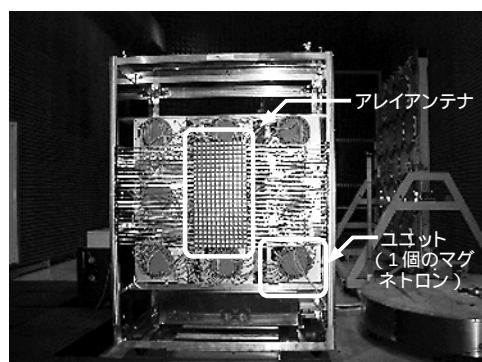


図2 マイクロ波送電サブシステム 9個のマグネトロンを協調動作させ、288個のアンテナより1.26 kW以上のマイクロ波を送電する。



図3 ビーム形成制御サブシステム 144個の各アンテナの出力を低損失移相器で制御し、細かな送電方向制御を行う。

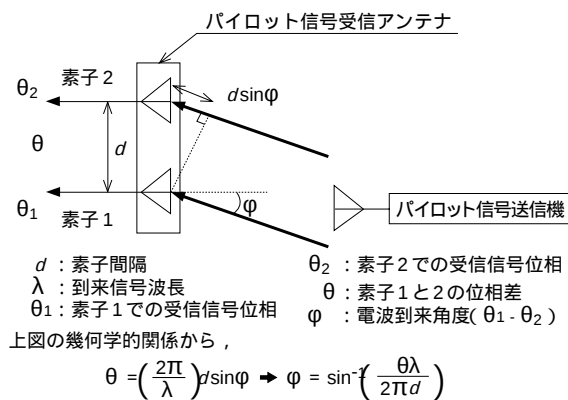


図4 パイロット信号による角度検出原理 複数のアンテナでの受信位相差よりマイクロ波到来方向を検出する。

1台のマグネトロン出力は、32個のアンテナに分配して空間に放射されるが、その間の減衰を最小限にするために、従来よりも低損失のラジアル型32分配器（導波管入力、同軸出力）を開発した。これによりマグネトロン出力からアンテナへの給電効率70.5%という高効率を実現した。

3.2 ビーム形成制御サブシステム

図3にビーム形成制御サブシステムを示す。

本サブシステムでは、安定したマイクロ波をフェーズドアレイアンテナから放射することによる合成ビームの形成と、高精度なビームの方向制御を行うために、以下のような技術的特徴を有している。

本サブシステムのマイクロ波発生部では、水晶発振器の発振周波数を基準としたPLL（Phase Locked Loop）シンセサイザ方式を採用し、周波数偏差10 ppm以内の安定度を実現させた。また、発生したマイクロ波を4台の並列高出力半導体アンプで電力増幅し、その後段の伝送線路の電気長調整で電力合成を行い、高出力マイクロ波を出力させた。

マイクロ波発生部から各アンテナへの伝送路は、高出力マ

イクロ波を低損失かつ等位相角で分配／給電するために、ラジアル型導波管分配器（9分配）及びウィルキンソン型分配器（16分配）を開発し、適用した。

移相器には、小型で、単純な構造かつ低挿入損失の特長を持つ、ライン切替型（前段）と反射型（後段）の組合せにより、0～337.5°の範囲を22.5°間隔で位相制御可能なハイブリッド型4 bit移相器を開発し、適用した。

本移相器の制御は、1 bitの制御信号に応じて前段部の0°と180°に相当するラインをSPDT（Single Pole Double Throw）スイッチにより切り替える機能と、3 bitの制御信号に応じて後段部のバラクタダイオードの印加電圧を変えることで、0～157.5°の範囲を22.5°間隔で位相制御する機能により行っている。

また、フェーズドアレイアンテナは、放射ビーム合成の最適化（主放射方向以外への不要放射低減など）による放射効率の向上に関する研究を行うために、アンテナ素子間隔を0.6～1波長の範囲で任意に設定できる仕様となっている。

また、ビーム形成制御サブシステムは、受電側から送電側

に対して送電方向を伝えるためのパイロット信号送受信装置を有する。受電側にパイロット信号送信機を設置し、送電側のパイロット信号受信機に対して信号を送信する。パイロット信号受信機は、複数の受信アンテナで信号を受信し、各受信アンテナで受信した信号の位相差から、幾何学的にパイロット信号の到来角度を計算し、パイロット信号送信機の位置を割り出す。図4にパイロット信号による角度検出の原理を示す。

パイロット信号は、無線LAN等にも用いられている周波数拡散(SS: Spread Spectrum)技術を適用し擬似雑音(PN: Pseudo Noise)符号で拡散しており、送電側のPN符号と同じPN符号で相関処理可能な信号のみを選択受信する。さらに、周波数拡散により、雑音に対する耐性も向上する。

3.3 マイクロ波受電整流サブシステム

マイクロ波受電整流サブシステムは、前述のマイクロ波送電サブシステム、及びビーム形成制御サブシステムより送られてきたマイクロ波を、レクテナと呼ばれる受電素子で受信・整流し、再び、直流電力に変換する役割を果たすシステムである。この際、周辺環境や人体に対する安全性を考慮して、マイクロ波受信側のエネルギー密度を小さくするため、大電力を受信するには、大面積のアンテナ面が必要となる。

したがって、本サブシステムは、輸送時にはコンパクトに折畳めて、設置箇所では大面積を構成できるよう、複数のパネルが展開ヒンジで連結された構造体を基本構造とし、その各パネル表面にはマイクロ波を受信・整流し電気エネルギーに変換するレクテナを、また、裏面には受電状況をモニタリングするモニタ基板、そして、これら複数の基板をつなぐ信号、電気ケーブル等から構成される。

このサブシステムには、

- (1) 展開順序の制御や、収納時や展開後の形状を保つためのラッチ(固定)機構を備えており、その動作順序を制御することで、展開・収納動作が可能。
- (2) 各パネル面に固定されたレクテナ基板、モニタ基板、ラッチ機構等は、各々電気ケーブルでつながっており、その状態のままで、収納・展開が可能である。

といった特徴がある。図5に本サブシステムの展開順序を示す。

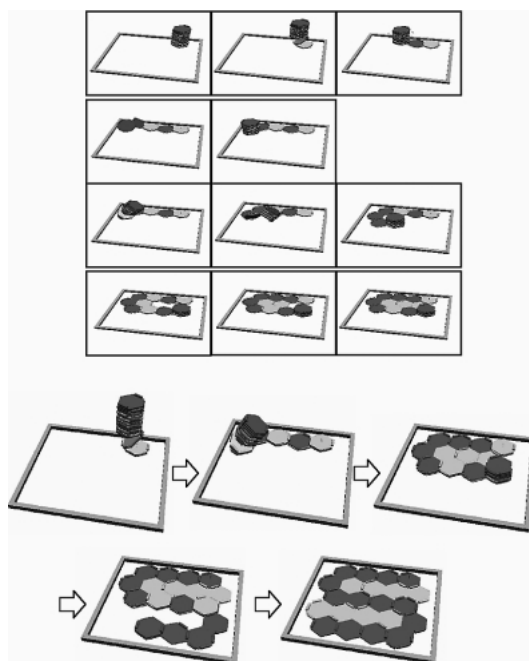


図5 平面展開型レクテナアレイの展開順序 積み上げられた六角形のパネルを順に展開し、平面型の受電部を形成する。

4. 成果

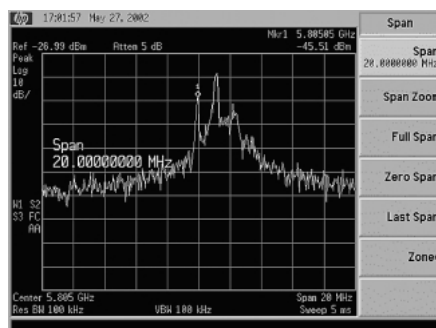
4.1 マイクロ波送電サブシステム

図6に位相制御マグネトロン出力スペクトラム及び陽極電流に対する注入信号と出力の位相差を示す。

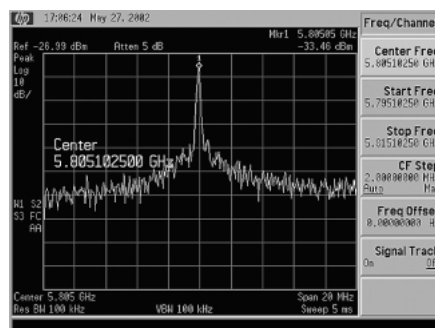
図6(a)は注入同期前で、マグネトロンの自動発振によりスペクトラムは広がっている。図6(b)は注入同期を行った後で、スペクトラムは注入信号に同期し急峻になっている。また、図6(c)は注入同期時の陽極電流に対する注入信号と出力の位相差である。図中の“同期範囲”の区間で周波数が同期し、A点で位相が一致する。この後位相状態がA点になるように陽極電流を制御する。図6(c)のように初期の位相同期処理の後、安定した位相制御が実現されていることを確認した。

4.2 ビーム形成制御サブシステム

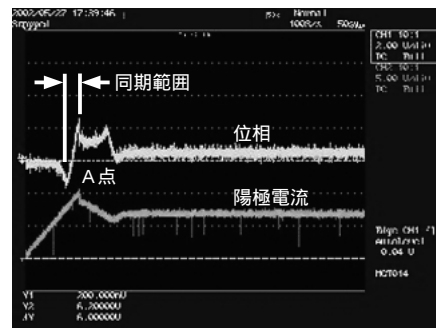
ビーム形成制御サブシステムのマイクロ波ビームパターンの測定結果を図7に示す。



(a) 注入同期前



(b) 注入同期後



(c) 陽極電流制御による位相差

図6 位相制御マグネトロン出力スペクトラム及び陽極電流に対する注入信号と出力の位相差 出力周波数は同期する。位相差は陽極電流で制御し統一する。

マグネトロンに基準信号を注入することで

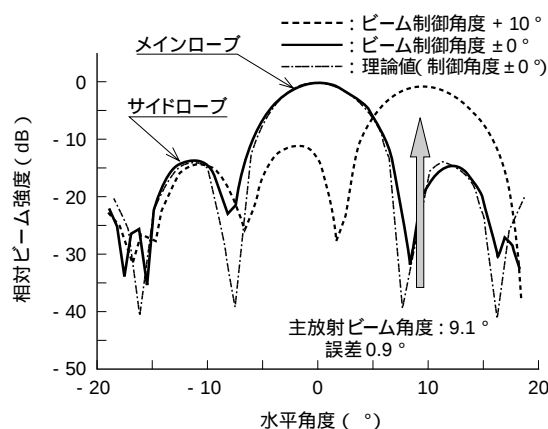


図7 マイクロ波ビームパターン ビーム方向を+10°に設定し、実測+9.1°を指しており、誤差は0.9°に収まっている。

正面方向のビームパターンは、0°を中心にほぼ左右対称形であり、ビーム強度が最も大きいメインローブに対して、主放射方向以外への不要放射となるサイドローブは約-13 dB以下と十分小さく、ほとんどの放射電力がメインローブに含まれたパターンが形成されている。

したがって、本サブシステムでは、理論的なパターンと一致した合成ビームが形成されていることを確認できた。

また、放射ビームを水平方向+10°へ制御した場合、正面方向のビームパターンと同等の放射特性を有したメインローブが水平約+10°方向に生じていることより、ビーム方向制御により合成ビームが形成されることを確認できた。

なお、ビーム制御角度+10°に対してビームの主放射角度は+9.1°となり、ビーム方向設定誤差は0.9°である。この誤差は、移相器の位相設定誤差及び測定誤差に起因していると考えられ、移相器の位相設定精度向上は今後の技術課題である。

図8にパイロット信号送受信機の特性を示す。同図はパイロット信号の到来角度検出誤差を示しており、誤差は0.7°以下である。精度向上はビーム制御同様今後の技術課題であるものの、仕様の±5°を満足する結果が得られた。

4.3 マイクロ波受電整流サブシステム

22枚のパネルからなる平面型展開レクテナアレイ構造体、及び20枚のパネルからなる擬似球面型レクテナアレイ構造体を製作し、実際に展開・収納動作が可能であることを実証した。図9に展開された平面型のマイクロ波受電整流サブシステムを示す。本サブシステムを用いた送受電実験では、マイクロ波送電サブシステム、及びビーム形成制御サブシステムから送信された、狭指向のマイクロ波ビームが、目標とするパネルによって受信されたことを示すLEDの点灯が確認された。

また、レクテナの最大電力変換効率が71.8%の高効率であることが確認された。

5. ま と め

本システムは、平成14年3月に京都大学・宙空電波科学研究センター内マイクロ波エネルギー伝送実験棟に設置さ

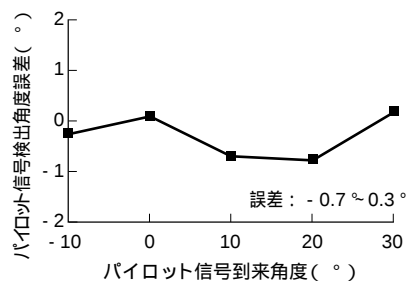


図8 パイロット信号送受信機検出角度誤差 パイロット信号送受信機の誤差は-0.7～0.3°と小さい。

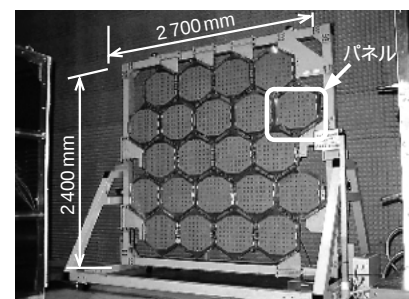


図9 平面展開型の受電整流サブシステム 展開した平面型受電整流サブシステム。22枚のパネルより構成されている。

れ、現在は宇宙太陽発電システムに関する研究開発のために使用されている。

本システムの開発を通して、今後の宇宙太陽発電システム開発に必要となる、マグネトロン位相制御技術、低損失のマイクロ波回路技術やビーム制御等に関する基本技術を確認することができた。また、今回の開発実績及び習得技術を活用し、宇宙太陽発電システムの関連要素技術の継続的な研究開発を通して、技術蓄積を行っている。

なお、マイクロ波無線電力伝送技術は、宇宙太陽発電システムにおける基幹電力供給だけでなく、軌道上宇宙機への送電、離島への電力供給や災害時の緊急電力供給などへの利用が期待されており、将来の新規事業への発展の可能性を持つ、有望な技術分野である。今後も産・学・官連携の下に宇宙太陽発電システムの実現に向けて研究開発及びPR活動を積極的に推進していく。

参 考 文 献

- (1) 京都大学仕様書：5.8ギガ宇宙太陽発電無線電力伝送システム（平成13年5月）



飯塚健二
技術本部
高砂研究所
電子技術研究室



長谷川修
技術本部
高砂研究所
機器・自動化装置研究室



森下慶一
技術本部
高砂研究所
電子技術研究室長



木村友久
名古屋航空宇宙システム製作所
宇宙機器技術部
電子装備設計課



牧村裕樹
名古屋航空宇宙システム製作所
研究部
飛行システム研究課



松本紘
京都大学
宙空電波科学研究センター長
教授 工博



橋本弘藏
京都大学
宙空電波科学研究センター
教授 工博



篠原真毅
京都大学
宙空電波科学研究センター
助教授 博(工)